

Transmisor VLC Eficiente Basado en el Reparto de la Potencia entre Convertidores CC/CC Modulados por Ancho de Pulso

Juan Rodríguez¹, Diego G. Lamar¹, Pablo F. Miaja², Daniel G. Aller¹ y Javier Sebastián¹

¹Universidad de Oviedo, Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (e-mail: rodriguezmjuan@uniovi.es)
Edificio Departamental nº 3. Campus Universitario de Viesques. 33204 Gijón. España.

²Power Systems Division, European Space Agency, Holanda.

Resumen—La Comunicación por Luz Visible (VLC) ha experimentado un gran auge durante los últimos años. Esta aplicación consiste en utilizar los LEDs de Alta Eficiencia (HB-LEDs) no solo para iluminar, sino también para transmitir información mediante cambios muy rápidos de la intensidad de la luz. Sin embargo, VLC presenta varios cuellos de botella que están ralentizando su comercialización. Uno de los mayores problemas es la baja eficiencia energética alcanzada por los *drivers* de HB-LEDs propuestos hasta la fecha para esta aplicación. Con objeto de reducir este problema, en este artículo se presenta un *driver* de HB-LEDs compuesto por dos convertidores CC/CC cuyas salidas están conectadas en serie. Uno de ellos es un convertidor de respuesta rápida que se encarga de la comunicación, mientras que el segundo convertidor presenta unas características similares a los empleados en *drivers* convencionales de HB-LEDs para la iluminación. De esta forma, este segundo convertidor se encarga de garantizar que el punto de trabajo de los HB-LEDs sea el adecuado. El reparto de la potencia permite minimizar la potencia entregada por el convertidor de respuesta rápida, el cual presenta altas pérdidas de conmutación debido a la alta frecuencia de conmutación requerida para reproducir la señal de comunicación. De este modo se consigue una maximización de la eficiencia energética global para cada posible punto de operación (es decir, para cada nivel de iluminación y potencia de la señal de comunicación). Además, el transmisor propuesto es capaz de reproducir un amplio rango de modulaciones, incluyendo la más recomendada para VLC: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).

Palabras Clave—Alta frecuencia de conmutación, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), Comunicación por Luz Visible (VLC), LEDs de Alta Eficiencia (HB-LEDs).

I. INTRODUCCIÓN

LA comunicación inalámbrica es fundamental para nuestra sociedad. Ejemplo de ello es que en la actualidad están surgiendo una gran cantidad de aplicaciones que se basan tanto en la comunicación entre personas como en la comunicación de una persona con los numerosos dispositivos presentes en su entorno. Como consecuencia, el tráfico de datos móviles ha crecido exponencialmente durante la última década y se espera que esta tendencia continúe a lo largo de los próximos años [1]. El problema es que el espectro radioeléctrico es limitado y actualmente está cerca de la saturación. La Comunicación por Luz Visible (VLC) es una de las opciones más interesantes para aliviar el problema [2]-[5]. En esta aplicación los LEDs de Alta

Eficiencia (HB-LEDs) son utilizados tanto para iluminar como para la transmitir información. Esto se consigue haciendo circular una forma de onda de corriente a través de los HB-LEDs cuya componente DC determina el nivel de iluminación, mientras que las variaciones (es decir, la componente AC) representa la información a transmitir. Esta forma de onda de corriente se traduce en una forma de onda de intensidad de luz proporcional, cuyas variaciones son imperceptibles por el ojo humano. Posteriormente, un receptor basado en el uso de un fotodiodo transforma la intensidad de luz incidente en una tensión proporcional que es demodulada digitalmente.

Típicamente, los HB-LEDs de iluminación ofrecen un ancho de banda de entre 3 y 5 MHz [6]. Por tanto, el *driver* de HB-LEDs debe ser capaz de reproducir formas de onda de corriente del orden de MHz para aprovechar todo el ancho de banda disponible. Además, es necesario reproducir esquemas de modulación avanzados para alcanzar las tasas de bits necesarias para que VLC alivie el problema de congestión del espectro radioeléctrico. La Fig. 1 muestra un ejemplo de forma de onda de intensidad de luz modulada que se requiere reproducir [ver Fig. 1(a)] junto con el *driver* de HB-LEDs que se utiliza típicamente en la literatura [ver Fig. 1(b)]. Como se puede ver, se trata de un *driver* de HB-LEDs basado en un Amplificador de Potencia Lineal (LPA) de Clase A o AB, el cual difícilmente alcanza rendimientos superiores al 40%. Por tanto, el LPA permite lograr el ancho de banda necesario para VLC sacrificando uno de los grandes beneficios de la iluminación HB-LED: su alta eficiencia energética. Este problema ha sido estudiado en varios artículos recientes [7]-[13]. En [7]-[8] se pueden encontrar varios transmisores VLC que están basados completa o parcialmente en el uso de convertidores CC/CC con objeto de obtener un alto rendimiento. Sin embargo, es necesario abordar el problema desde un punto de vista más técnico, considerando ciertos aspectos que estos trabajos

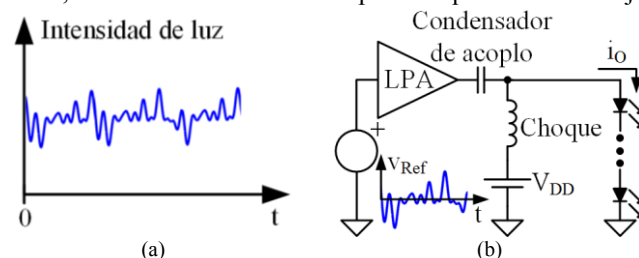


Fig. 1. (a) Intensidad de luz modulada según un esquema de modulación avanzado. (b) *Driver* de HB-LEDs basado en un LPA.

obvian, como es la dependencia del comportamiento del HB-LED con la temperatura. En [9]-[10] se propone un convertidor reductor bi-fase para reproducir esquemas de modulación mono-portadora a partir del rizado de la tensión de salida del convertidor. El mayor problema de este método es que la técnica descrita no es válida para la reproducción de esquemas multi-portadora, los cuales son los más recomendados para VLC [14]-[16].

En este artículo se propone un transmisor VLC capaz de reproducir tanto esquemas de modulación mono-portadora como multi-portadora. El *driver* de HB-LEDs propuesto se compone de dos convertidores CC/CC cuyas salidas están conectadas en serie [11]-[13], lo que ofrece una serie de ventajas que se comentan a lo largo del documento. El artículo presenta la siguiente estructura. Los requisitos para el gobierno de los HB-LEDs se describen en la sección II. En la sección III se muestran y se analizan los resultados experimentales. Finalmente, las conclusiones se recogen en la sección IV.

II. DRIVER DE HB-LEDs PARA VLC PROPUESTO

A. Requisitos para el Gobierno de los HB-LEDs

Estudiar la relación entre la intensidad de luz emitida por el conjunto de HB-LEDs (s_o), la corriente que circula a través de ellos (i_o) y la tensión aplicada al *string* (v_o) es fundamental para diseñar correctamente el *driver* HB-LEDs para VLC. Aunque el comportamiento del HB-LED depende del dispositivo concreto que se emplee, se pueden identificar ciertas características generales [17]-[19]. En primer lugar se puede asumir que la intensidad de la luz es proporcional a la corriente que circula por los HB-LEDs. Además, el modelo eléctrico de un HB-LED considera, típicamente, un diodo ideal en serie con una fuente de tensión constante (es decir, la tensión de codo: V_γ) y la resistencia dinámica (R_D). En este punto es esencial estudiar cómo afecta la temperatura de la unión del HB-LED (T_J) a estos parámetros. Básicamente lo que sucede es que V_γ experimenta una importante caída al aumentar T_J , mientras que R_D permanece prácticamente constante. La Fig. 2 ejemplifica el gobierno de un *string* de n HB-LEDs para VLC. Se puede ver que debido a la dependencia de V_γ con T_J , es necesario modificar la componente DC de tensión aplicada (v_{o-DC}). Sin embargo, dado que R_D es independiente de T_J , la componente

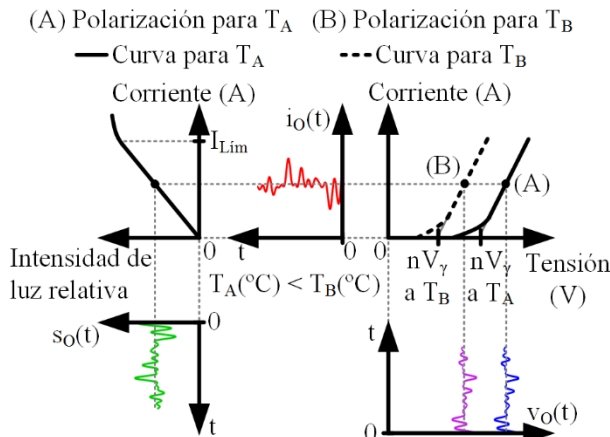


Fig. 2. Gobierno de un *string* de n HB-LEDs para VLC considerando las curvas luz vs corriente y corriente vs tensión de los dispositivos.

AC de v_o (v_{o-AC}) no se modifica. Por tanto, es imprescindible la utilización de un lazo de regulación de la corriente cuando se emplea un convertidor CC/CC para la implementación de un *driver* de HB-LEDs para VLC. No obstante, regular la corriente media por los HB-LEDs (i_{o-DC}) en lugar de toda la corriente (es decir, i_o) es suficiente para asegurar la operación deseada. De esta forma se consigue que el lazo de realimentación del convertidor no limite la rapidez del *driver* de HB-LEDs al reproducir i_{o-AC} (es decir, no se limita el ancho de banda de la comunicación).

B. Arquitectura Propuesta

La Fig. 3 muestra el *driver* de HB-LEDs para VLC propuesto, el cual se compone de dos convertidores CC/CC con sus salidas conectadas en serie. El convertidor inferior es un reductor síncrono que opera en lazo cerrado regulando i_{o-DC} . Por otra parte, el convertidor superior es un reductor P -fásico con filtro de orden M que opera en lazo abierto. Dicho convertidor se encarga de realizar las pequeñas variaciones de la tensión sobre el *string* de HB-LEDs, las cuales son necesarias para reproducir la señal de comunicación. El reductor P -fásico [20] fue concebido para su uso en *Voltage Regulator Modules* (VRMs) que alimentan microprocesadores por su gran eficiencia y ancho de banda [21]-[22]. Además, esta topología es ampliamente utilizada como amplificador de envolvente cuando se aplica la técnica de Seguimiento de Envolvente (ET) [23]-[30]. Por otra parte, el uso de filtros de orden superior también fue propuesto para reducir el rizado de la tensión de salida en los amplificadores de envolvente [27]-[35].

En el caso del *driver* de HB-LEDs propuesto, la tensión de salida del reductor P -fásico (v_{o-H}) es la suma de v_{o-AC} y un

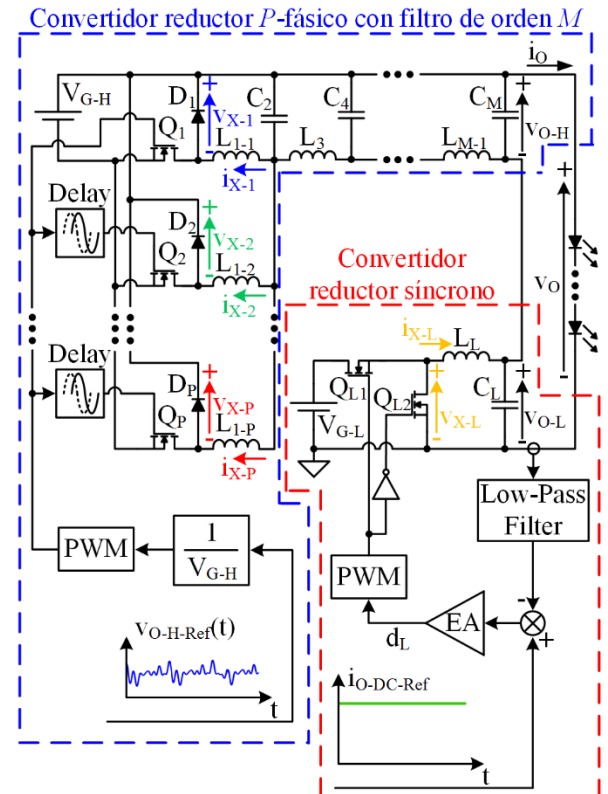


Fig. 3. *Driver* de HB-LEDs para VLC compuesto por un convertidor reductor P -fásico con filtro de orden M y un convertidor reductor síncrono.

cierto nivel de continua (v_{O-H-DC}). De esta forma, el reductor síncrono proporciona una tensión continua (v_{O-L}) que, añadida a v_{O-H-DC} , permite alcanzar el nivel de iluminación deseado. En resumen, el *driver* de HB-LED para VLC propuesto permite alcanzar un mayor rendimiento que la opción mostrada en Fig. 1(b) al tratarse de una arquitectura completamente basada en el uso de convertidores CC/CC. Además, la eficiencia global del *driver* propuesto puede ser maximizada mediante la minimización de la potencia entregada por el reductor P -fásico. En otras palabras, el reparto de las potencias entregadas por cada convertidor puede ser ajustado dinámicamente según los requisitos concretos de la aplicación VLC y del escenario de comunicación.

Por otra parte, es sabido que controlar MOSFETs flotantes es complicado cuando la frecuencia de conmutación es elevada. Este problema aparece en un reductor P -fásico convencional, donde la fuente de los MOSFETs se conecta a un punto de tensión no constante. Sin embargo, en la arquitectura propuesta la fuente de los MOSFETs se conecta al terminal negativo de la fuente de tensión de entrada (V_{G-H}). De esta forma, se facilita el control de dichos MOSFETs si la alimentación de sus circuitos de control se obtiene a partir de V_{G-H} . Hay que señalar que, como se muestra en la Fig. 3, es necesario modificar la posición del resto de elementos del convertidor para realizar correctamente la función del convertidor reductor.

Otra ventaja del diseño propuesto es que la conexión en serie de las salidas de los convertidores permite una reproducción precisa de v_{O-AC} con relativa facilidad. Es importante tener en cuenta que v_{O-AC} es pequeña en comparación con v_{O-DC} debido a V_γ . Como consecuencia, resulta difícil reproducir v_O cuando se usa un único convertidor reductor. En dicho caso se exigiría tener capacidad de realizar cambios muy pequeños del ciclo de trabajo en torno a un valor relativamente elevado. Afortunadamente, el reductor P -fásico propuesto se centra en generar las pequeñas variaciones de tensión mientras que el reductor síncrono proporciona la mayor parte de v_{O-DC} , facilitando la reproducción de v_O .

Como principal inconveniente se tiene la necesidad de emplear dos tensiones de entrada aisladas (V_{G-H} y V_{G-L}).

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Detalles del Prototipo

La Fig. 4 muestra los prototipos implementados de reductor bi-fase con filtro de cuarto orden junto con el reductor síncrono. La frecuencia de conmutación del reductor bi-fase es 10 MHz, mientras que en el caso del reductor síncrono es 250 kHz. En ambos convertidores se emplearon MOSFETs de silicio: SSM3K336R en el reductor bi-fase y TK7S10N1Z en el reductor síncrono. El *string* está compuesto por seis HB-LEDs (W42180 Seoul Semiconductor) conectados en serie. Las tensiones de entrada son 8.5 V en el reductor bi-fase y 24 V en el reductor síncrono.

Se reproduce un esquema de modulación multi-portadora 64-QAM-OFDM cuya máxima frecuencia es 3 MHz aproximadamente. Aunque el máximo bit rate que se puede alcanzar con el esquema de modulación reproducido es 17.4

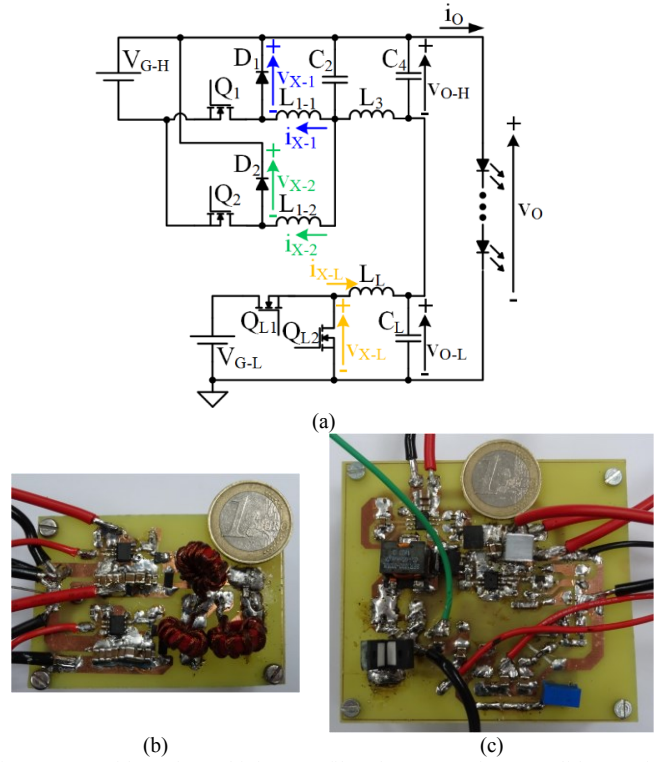


Fig. 4. Convertidor reductor bi-fase con filtro de cuarto orden con salida en serie con un convertidor reductor síncrono: (a) Esquema eléctrico. (b) Prototipo del reductor bi-fase. (c) Prototipo del reductor síncrono.

Mbps, la tasa de bits real alcanzada es de 11.4 Mbps debido a que durante la experimentación se desactivaron ciertas portadoras con objeto de reducir la tasa de bits erróneos.

B. Evaluación del compromiso entre eficiencia de la comunicación y eficiencia energética

El prototipo de *driver* de HB-LEDs para VLC es evaluado en profundidad testeando distintas condiciones de operación. El objetivo de la prueba consiste en estudiar cómo afecta el nivel de iluminación y la potencia de la señal de comunicación tanto a la eficiencia energética como a la eficiencia de la comunicación. Es sabido que el nivel de iluminación depende de la corriente media que circula por el *string* de HB-LEDs (es decir, i_{O-DC}). Por otra parte, la potencia de la señal de comunicación puede ser controlada ajustando el valor pico a pico de v_O (Δv_O). Es importante señalar que el esquema de modulación solo fija la forma de la señal de comunicación y que, por tanto, dicho esquema puede ser reproducido amplificando en mayor o menor medida la señal.

Para el test se consideran dos niveles de iluminación (determinados por $i_{O-DC}=300$ mA y $i_{O-DC}=500$ mA) y dos niveles de potencia de la señal de comunicación (determinados por $\Delta v_O=4.1$ V and $\Delta v_O=2.2$ V) que dan lugar a cuatro situaciones posibles. La Fig. 5 ejemplifica el test realizado y facilita la comprensión de los razonamientos que aparecerán en esta sección. La Fig. 6 muestra las formas de onda principales del sistema VLC implementado operando en cada situación. Señalar que v_{RX} denota la señal obtenida en el receptor comercial (PDA10A-EC), el cual se mantiene a 20 cm del transmisor durante todo el test. La componente DC de v_{RX}

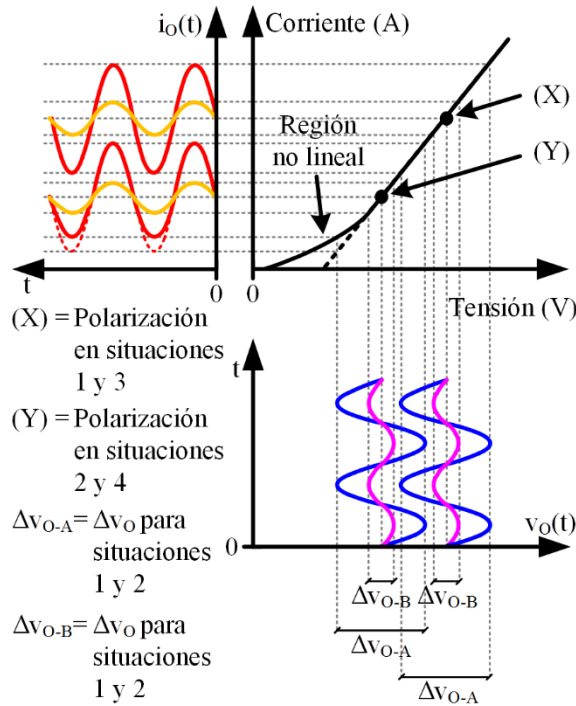


Fig. 5. Descripción gráfica del test experimental considerando la curva corriente vs tensión del *string* de HB-LEDs y formas de onda sinusoidales.

(v_{RX-DC}) está relacionado con el nivel de iluminación mientras que el valor pico a pico (Δv_{RX}) está determinado por la potencia de la señal de comunicación que llega al receptor. La Tabla I indica tanto la componente DC como el valor pico a pico de cada forma de onda. Además, muestra la potencia entregada por el reductor bi-fase (P_{O-H}) y por el reductor síncrono (P_{O-L}), la eficiencia energética global (η) y una figura de mérito que evalúa la eficiencia de la comunicación y que será explicada más adelante.

En la situación 1, i_{O-DC} y Δv_O son 500 mA y 4.1 V respectivamente. Es importante señalar que, como se indica en la Sección II.B, v_{O-AC} es pequeña en comparación con v_{O-DC} . Se puede ver que la mayor parte de v_{O-DC} se debe a v_{O-L} (es decir, al reductor síncrono). En la situación 1 el reductor síncrono entrega en 81% de la potencia y η es 91.3%.

La comparación de la situación 2 con la situación 1 permite estudiar el impacto de reducir el nivel de iluminación sobre η (i_{O-DC} se reduce de 500 mA a 300 mA). Para reducir el punto de polarización de los HB-LEDs, el reductor síncrono disminuye v_{O-L} y, como consecuencia, P_{O-L} . Dado que la potencia de la señal de comunicación es la misma, cabría esperar que los valores pico a pico de las formas de onda no cambiasen con respecto a la situación 1. Sin embargo, esto solo se cumple para

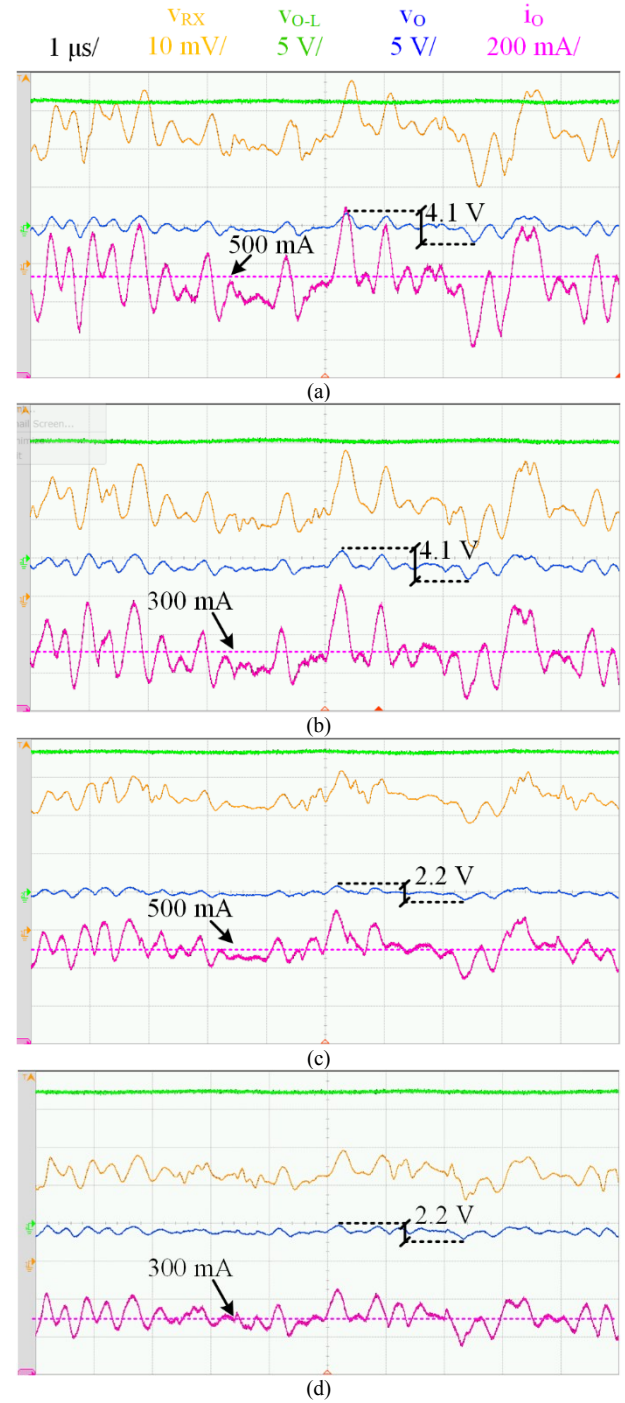


Fig. 6. Formas de onda principales del sistema VLC implementado durante el test: (a) Situación 1. (b) Situación 2. (c) Situación 3. (d) Situación 4.

TABLE I. PARÁMETROS PRINCIPALES DEL TEST EXPERIMENTAL

	i_{O-DC} (mA)	Δi_O (mA)	v_{O-DC} (V)	Δv_O (V)	v_{O-L} (V)	v_{RX-DC} (mV)	Δv_{RX} (mV)	P_{O-L} (W)	P_{O-H} (W)	P_O (W)	η (%)	EVM_{RMS} (%)
Situación 1	500	750	19.9	4.1	16.1	34	29	8.19	1.24	10.1	91.3	22.3
Situación 2	300	575	19	4.1	15.2	23	25	4.64	1.23	5.87	88.6	27.6
Situación 3	500	350	19.9	2.2	18.2	34	15	9.56	0.52	10.08	93.6	23.2
Situación 4	300	300	19	2.2	17.3	23	15	5.31	0.51	5.82	91.3	24

Δv_O . Δi_O disminuye levemente debido a que el *string* de HB-LEDs opera parcialmente en la región no lineal y, como resultado, Δv_{RX} también decrece. Este hecho se puede entender fácilmente observando la Fig. 5. Más adelante se explica cómo la operación en zona no lineal afecta a la comunicación. Las condiciones de operación del reductor bi-fase son prácticamente iguales en las situaciones 1 y 2, mientras que el reductor síncrono entrega menos potencia en la situación 2. Por tanto, el peso de la eficiencia del reductor síncrono en η disminuye con respecto a la situación 1 y, como resultado, η decrece.

Para estudiar el impacto de reducir la potencia de la señal de comunicación sobre η se puede comparar la situación 3 con la situación 1 (Δv_O se reduce de 4.1 V a 2.2 V). Como cabría esperar, todos los valores pico a pico de las formas de onda cambian, mientras que i_{O-DC} , v_{O-DC} y v_{RX-DC} permanecen constantes con respecto a la situación 1. Es importante destacar que aunque v_{O-DC} permanece invariante, el reparto de tensión continua entregada por cada convertidor no es la misma que en la situación 3. Esto se debe a que como Δv_O ha disminuido, se puede reducir la componente DC de v_{O-H} (es decir, v_{O-H-DC}) para minimizar la potencia entregada por el reductor bi-fase. Como consecuencia, el reductor síncrono incrementa automáticamente su tensión de salida para mantener el nivel de iluminación gracias al lazo de realimentación. Indicar que aunque la potencia total entregada por el *driver* es similar en las situaciones 1 y 3, el reparto de potencia es diferente: el reductor síncrono entrega más potencia en la situación 3 (94.8% de la potencia total) debido a la estrategia seguida para minimizar la potencia entregada por el reductor bi-fase. Como resultado, la eficiencia del reductor síncrono tiene un mayor peso en la situación 3 que en la 1, lo que provoca el aumento de η .

Finalmente, la situación 4 permite comprobar lo que sucede cuando disminuye tanto el nivel de iluminación (i_{O-DC} se reduce de 500 mA a 300 mA) como la potencia de la señal de comunicación (Δv_O se reduce de 4.1 V a 2.2 V). El análisis es directo siguiendo las dos comparativas anteriores. En esta situación la potencia total entregada por el *driver* es 5.82 W, el reductor síncrono entrega el 91.2% de la potencia y η es 91.3%.

Como conclusión se tiene que minimizar la potencia de la señal de comunicación y maximizar el nivel de iluminación permite alcanzar unos mayores rendimientos energéticos. Sin embargo, es necesario estudiar cómo afecta tanto la potencia de la señal de comunicación como el nivel de iluminación a la eficiencia de la comunicación, la cual depende principalmente de dos parámetros: la distorsión y la potencia de la señal recibida. Por lo general, cuanto mayor es la potencia de la señal que llega al receptor, mayor es la eficiencia de la comunicación puesto que la señal se puede demodular más fácilmente. Por otra parte, al aumentar la distorsión de la señal, se reduce la eficiencia de la comunicación puesto que se producen más errores durante la demodulación.

El valor cuadrático medio de la magnitud del vector error (EVM_{RMS}) [36] es una figura de mérito ampliamente utilizada para evaluar el rendimiento de sistemas de comunicación. Hay que señalar que cuanto menor sea EVM_{RMS} , mayor será la eficiencia de comunicación. La Tabla I muestra los valores

obtenidos para cada situación. Se puede ver que el mejor resultado se logra cuando i_{O-DC} es 500 mA y Δv_O es 4.1 V (es decir, en la situación 1). EVM_{RMS} experimenta un gran aumento al reducir el nivel de iluminación considerablemente aun cuando se mantiene la potencia de la señal de comunicación (esto es lo que sucede al pasar de la situación 1 a la 2). Esto se debe a que el *string* de HB-LEDs debe operar en la zona en que se tiene una relación lineal entre corriente y tensión para que la reproducción de la señal de comunicación sea correcta. Esto no ocurre en la situación 2, donde Δv_O es muy grande para el valor de i_{O-DC} considerado (la Fig. 5 puede ayudar a comprender este razonamiento). En esta situación el punto de polarización de los HB-LEDs está cerca de la tensión de codo (es decir, en la región no lineal), causando una gran distorsión de la señal. Por tanto, se debe reducir la potencia de la señal de comunicación para evitar la operación en zona no lineal si se quiere utilizar el nivel de iluminación de la situación 2. De esta forma, disminuyendo Δv_O se consigue una reducción de EVM_{RMS} , lo que es equivalente a pasar de la situación 2 a la 4. Sin embargo, como la reducción EVM_{RMS} se consigue gracias a la reducción de la potencia de la señal de comunicación, el valor de EVM_{RMS} obtenido no es tan bajo como el logrado en la situación 1. Finalmente, se puede reducir EVM_{RMS} sin aumentar la potencia de la señal de comunicación elevando el nivel de iluminación para evitar completamente la operación no lineal (es decir, pasar de la situación 4 a la 3).

Como conclusión, existe un compromiso entre eficiencia energética y eficiencia de comunicación. Para un cierto nivel de iluminación, se debe maximizar la potencia de la señal de comunicación sin alcanzar la operación no lineal. Sin embargo, desde el punto de vista energético, los mejores resultados se obtienen al minimizar la potencia de la señal de comunicación.

IV. CONCLUSIONES

Aunque VLC es una aplicación que muestra un gran potencial para reducir la congestión del espectro radioeléctrico, presenta ciertos cuellos de botella que están ralentizando su implantación. Uno de los problemas más importantes es el bajo rendimiento energético logrado por los *drivers* de HB-LEDs que han sido propuestos para VLC. La solución presentada en este artículo tiene como objetivo mejorar el rendimiento optando por un diseño de *driver* completamente basado en el uso de convertidores CC/CC capaces de alcanzar el elevado ancho de banda demandado por esta aplicación. La arquitectura propuesta se compone de un reductor *P*-fásico con filtro de alto orden y de un reductor síncrono. El gran ancho de banda alcanzado por el reductor *P*-fásico permite reproducir fielmente la señal de comunicación. Sin embargo, dado que requiere una frecuencia de conmutación del orden de MHz, su rendimiento está condicionado por las elevadas pérdidas de conmutación. El convertidor reductor síncrono asegura la correcta polarización de los HB-LEDs y permite minimizar la potencia entregada por el reductor *P*-fásico, logrando una mayor eficiencia energética global. Además, la conexión en serie de salidas permite reproducir las pequeñas variaciones de la señal de comunicación exigiendo una precisión asumible en el ciclo de trabajo. Finalmente, los resultados experimentales permiten

comprobar el compromiso que existe entre eficiencia de la comunicación y eficiencia energética.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado mediante la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R y la beca FPU con referencia FPU14/03268; y del Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto SV-PA-17-RIS3-4 y de los fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] Cisco Systems, "Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016-2021", Feb. 2017. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] "IEEE standard for local and metropolitan area networks--part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light," in IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp.1-309, Sept. 6 2011.
- [3] GBI Research, "Visible Light Communication (VLC)—a potential solution to the global wireless spectrum shortage", Sep. 2011 [Online]. Available: <http://www.gbiresearch.com>
- [4] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 9, pp. 56–62, Sep. 2011.
- [5] A. Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," in IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 12, pp. 26-32, December 2013.
- [6] J. Grubor, S. C. J. Lee, K. D. Langer, T. Koonen and J. W. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication - Post-Deadline Papers (published 2008), Berlin, Germany, 2007, pp. 1-2.
- [7] J. Sebastián, D. G. Aller, J. Rodríguez, D. G. Lamar and P. F. Miaja, "On the role of the power electronics on visible light communication," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 2420-2427.
- [8] J. Rodríguez, D. G. Lamar, D. G. Aller, P. F. Miaja and J. Sebastián, "Efficient visible light communication transmitters based on switching-mode dc-dc converters," in Sensors, vol. 18, no. 4, 2018.
- [9] J. Rodriguez, D. G. Lamar, J. Sebastian and P. F. Miaja, "Taking advantage of the output voltage ripple of a two-phase buck converter to perform quadrature amplitude modulation for visible light communication," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 2116-2123.
- [10] J. Rodriguez, P. Fernandez Miaja, D. G. Lamar and J. Sebastian, "Reproducing single-carrier digital modulation schemes for VLC by controlling the first switching harmonic of the DC-DC power converter output voltage ripple," in IEEE Transactions on Power Electronics.
- [11] J. Rodriguez, D. G. Aller, D. G. Lamar and J. Sebastian, "Energy efficient visible light communication transmitter based on the split of the power," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 217-224.
- [12] J. Rodriguez, D. G. Aller, D. G. Lamar, and J. Sebastian, "Performance evaluation of a VLC transmitter based on the split of the power," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018.
- [13] J. Rodríguez, D. G. Lamar, P. Fernandez Miaja, D. G. Aller and J. Sebastian, "Power efficient VLC transmitter based on pulse-width modulated DC-DC converters and the split of the power," in IEEE Transactions on Power Electronics.
- [14] J. Armstrong and A. J. Lowery, "Power efficient optical OFDM," in Electronics Letters, vol. 42, no. 6, pp. 370-372, 16 March 2006.
- [15] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas and B. Pricope, "OFDM visible light wireless communication based on white LEDs," 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring, Dublin, 2007, pp. 2185-2189.
- [16] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications," in Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, Feb.1, 2009.
- [17] A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics," in J. Appl. Phys., vol. 104, no. 9, pp. 093104-1-093104-8, Nov. 2008
- [18] Osram Opto Semiconductors, "LED fundamentals. Thermal characteristics of LEDs", Aug. 2011. [Online]. Available: https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2013/01/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Thermal-Characteristics-of-LEDs_v2_08-16-11_SCRIPT.pdf
- [19] On Semiconductor, "LED lighting. Definitions and characteristics", TND3228/D, Sep. 2007. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TND328-D.PDF>
- [20] W. Chen, "High efficiency, high density, polyphase converters for high current applications," Linear Technology Corporation, Sept. 1999 [Online]. Available: <http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1003,C1042,C1032,C1062,P1726,D4166>
- [21] X. Zhou, P. L. Wong, P. Xu, F. C. Lee and A. Q. Huang, "Investigation of candidate VRM topologies for future microprocessors," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp. 1172-1182, Nov 2000.
- [22] X. Zhou, P. Xu and F. C. Lee, "A novel current-sharing control technique for low-voltage high-current voltage regulator module applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp. 1153-1162, Nov 2000.
- [23] A. Soto, J. A. Oliver, J. A. Cobos, J. Cezon and F. Arevalo, "Power supply for a radio transmitter with modulated supply voltage," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, 2004, pp. 392-398 Vol.1.
- [24] M. C. W. Hoyerby and M. E. Andersen, "High-bandwidth, high-efficiency envelope tracking power supply for 40W RF power amplifier using paralleled bandpass current sources," 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Recife, 2005, pp. 2804-2809.
- [25] O. Garcia, A. de Castro, A. Soto, J. A. Oliver, J. A. Cobos and J. Cezon, "Digital control for power supply of a transmitter with variable reference," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., Dallas, TX, 2006, pp. 6 pp.-.
- [26] P. Cheng, M. Vasić, O. García, J. A. Oliver, P. Alou and J. A. Cobos, "Minimum time control for multiphase buck converter: analysis and application," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 2, pp. 958-967, Feb. 2014.
- [27] J. Sebastián, P. Fernández-Miaja, F. J. Ortega-González, M. Patiño and M. Rodríguez, "Design of a two-phase buck converter with fourth-order output filter for envelope amplifiers of limited bandwidth," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 11, pp. 5933-5948, Nov. 2014.
- [28] P. F. Miaja, A. Rodríguez and J. Sebastián, "Buck-derived converters based on gallium nitride devices for envelope tracking applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 4, pp. 2084-2095, April 2015.
- [29] Y. Zhang, M. Rodríguez and D. Maksimović, "Output filter design in high-efficiency wide-bandwidth multi-phase buck envelope amplifiers," 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, 2015, pp. 2026-2032.
- [30] Y. Zhang, J. Strydom, M. de Rooij and D. Maksimović, "Envelope tracking GaN power supply for 4G cell phone base stations," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 2292-2297.
- [31] M. C. W. Hoyerby and M. A. E. Andersen, "Ultrafast tracking power supply with fourth-order output filter and fixed-frequency hysteretic control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2387-2398, Sept. 2008.
- [32] A. Garcia i Tormo, A. Poveda, E. Alarcon and F. Guinjoan, "Design-oriented characterisation of adaptive asynchronous $\Sigma\Delta$ modulation switching power amplifiers for bandlimited signals," 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 2009, pp. 2882-2885.
- [33] J. Sebastián, P. Fernández-Miaja, A. Rodríguez and M. Rodríguez, "Analysis and design of the output filter for buck envelope amplifiers," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 213-233, Jan. 2014.
- [34] P. F. Miaja, J. Sebastián, R. Marante and J. A. García, "A linear assisted switching envelope amplifier for a UHF polar transmitter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1850-1861, April 2014.
- [35] M. Rodríguez, Y. Zhang and D. Maksimović, "High-frequency PWM buck converters using GaN-on-SiC HEMTs," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2462-2473, May 2014.
- [36] E. McCune, *Practical digital wireless signals*. Cambridge University Press, 2010.